约束与增长双向引导的黄土丘陵沟壑区县城"三生"空间优化
——以米脂县城中心城区为例

贾若楠[1]， 吴左宾[1,2]
（1. 西安建筑科技大学，陕西 西安 710055；2. 西安建大城市规划设计研究院有限公司，陕西 西安 710055）

摘 要：在黄土丘陵沟壑区生态本底强约束及城镇发展需求日益增长的背景下，探讨"三生"空间优化为促进该地区资源合理配置提供参考。基于黄土丘陵沟壑区生态约束与城镇增长的双向引导，提出生态基底辨识与城镇增长模拟相结合的集成性研究方法。以米脂县城中心城区为例，采用MCR模型评价中心城区生态基底条件，利用FLUS-Markov模型模拟2035年中心城区"三生"空间分布，基于此识别生态基底条件与2035年"三生"空间分布的冲突激烈区、冲突中度区与冲突微弱区，并对各冲突区域提出优化策略。结果表明：(1) 米脂县城中心城区生态基底条件划分为3个等级：生态保护区、生态控制区和一般生态区，其中生态保护区面积最大，一般生态区面积最小。(2) 2035年自然发展情景下米脂县城中心城区生态空间面积减少803.33 hm^2，生产与生活空间面积均呈增长态势，增长面积分别为612.03 hm^2、191.30 hm^2。(3) 米脂县城中心城区有40.80%的用地在未来存在冲突风险，冲突激烈区面积1606.54 hm^2，约占城区的23.29%，冲突中度区面积968.19 hm^2，约占城区的14.04%，冲突微弱区面积239.32 hm^2，约占城区的3.47%，针对各冲突分区特点，提出生态优先、适度融合和兼容发展的"三生"空间优化策略。

关 键 词：黄土丘陵沟壑区；"三生"空间；生态约束；城镇增长；冲突识别
文章编号：1000－6060(2025)02－0333－12(0333～0344)

党的十八大报告提出"促进生产空间集约高效、生活空间宜居适度、生态空间山清水秀"，强调优化国土空间格局，把生态文明建设放在突出地位。党的二十大报告中提出"坚持山水林田湖草沙一体化保护和系统治理"，强调生态文明建设过程中各资源要素保护和治理的重要性。2019年中共中央国务院在《关于建立国土空间规划体系并监督实施的若干意见》中提出科学布局生产空间、生活空间、生态空间是推进生态文明建设的关键举措。在这一背景下，如何促进生态、生产和生活空间的有机协调，已经成为现代城镇发展与建设的重要议题。然而伴随着我国城镇化的不断推进，生态环境破坏、生产利用效率低、生活空间宜居性降低等问题依然存在，"三生"空间矛盾有待进一步解决。因此，研究"三生"空间优化策略、解决"三生"矛盾对于构建"三生"协同发展格局，促进资源合理配置具有重要意义。

目前，学界对"三生"空间的研究内容主要聚焦在功能识别、空间演变与空间优化等方面。其中，功能识别主要从土地类型归类、指标量化测度及利用POI等新兴数据等方面进行[1-2]。空间演化主要聚焦在分析"三生"空间一段时间内所呈现的空间变化特征和驱动要素，研究多采用土地利用动态度、空间自相关分析、转移矩阵等方法[3-4]。现有空间优化方面的研究主要聚焦在空间现实问题剖析的基础上，从适宜性和空间模拟等方面提出优化

收稿日期：2024-04-29； **修订日期**：2024-08-27
基金项目：国家重点研发计划课题(2022YFC3802803)；国家自然科学基金项目(52178055)资助
作者简介：贾若楠(1994-)，女，博士研究生，主要从事国土空间规划等方面的研究. E-mail: jrndyx@163.com
通讯作者：吴左宾(1977-)，男，高级工程师，主要从事城乡规划与设计等方面的研究. E-mail: ben-wzb@xauat.edu.cn

调整方案[5]。从研究尺度及研究对象上看，现有研究大多以流域、城市群、省市等大尺度为主，如刘荣增等[6]、翟玉鑫等[7]分别从郑州都市圈、博斯腾湖流域等尺度展开三生空间研究。此外，研究对象大多聚焦于我国东南地区[8-9]，对于黄土丘陵沟壑区的研究相对较少。现有研究方法大多分为两类，第一种采用PLUS、CLUE-S等空间模拟方法预测未来“三生”空间发展方向并据此提出优化调整方案[10-11]；另一种是基于用地适宜性评价，识别现状与用地适宜性冲突，进而提出空间优化策略[12]，但现有研究视角和方法相对单一，基于黄土丘陵沟壑区生态约束与城镇增长双引导视角，采用集成性方法的研究相对较少。

黄土丘陵沟壑区是我国典型的生态环境脆弱区，区内沟壑纵横、地表破碎、土质疏松，水土流失十分严重。区内沟道深度100~300 m，平均侵蚀强度约10000~25000 $t\cdot km^{-2}\cdot a^{-1}$之间，导致当地生态环境极为脆弱[13]，地区发展受地形地貌和生态环境强约束，导致城镇建设用地十分紧张。根据第七次全国人口普查主要数据公报，黄土丘陵沟壑区城镇化率约为53.32%，城镇化水平相对较低，城镇面临发展诉求，建设需求持续性增长，“三生”空间矛盾更为激烈。县级规划作为国土空间规划体系中承上启下、统筹实施的重要一环，其三生空间研究具有较强的现实意义和可操作性，而县城中心城区空间作为人类活动最密集的区域，其人地矛盾更加凸显，因此开展县城中心城区生态约束与城镇增长双向引导下的“三生”空间优化策略，对指导该地区国土空间优化实践，实现高质量发展具有重要的指导意义。

1 研究区概况

米脂县地处典型的黄土丘陵沟壑区，沟壑密度平均12 $km\cdot km^{-2}$，是生态环境脆弱、水土流失高发区，是陕西省水土流失的重点治理区，生态环境十分脆弱。同时，据米脂县2022年国民经济和社会发展统计公报统计米脂县城镇化率为46.3%，仍处于城镇化快速增长阶段，城镇发展需求持续增长，生态空间与生产空间、生活空间冲突明显。因此，米脂县具有研究的典型性与紧迫性。研究对象为米脂县城中心城区，为米脂县城建成区及与周边山体联系紧密区域围合而成的范围（图1），总面积约为6898.23 hm^2，区内沟壑纵横、梁峁起伏、地表破碎，

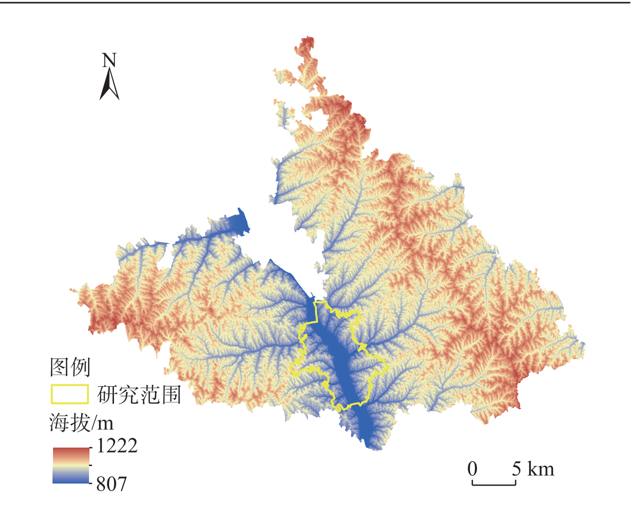


图1 研究区示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the study area

中部无定河穿城而过，河谷川道谷宽地平，现状生产效益低下、生活宜居性不足、生态威胁加剧等问题依然存在。

2 数据与方法

2.1 数据来源

本文涉及的2010年和2020年土地利用数据、交通及水系等数据从米脂县自然资源与规划局获取。DEM数据来源于中国科学院计算机网络信息中心地理空间数据云平台（https://www.gscloud.cn/），分辨率30 m。

2.2 研究框架

结合黄土丘陵沟壑区的生态脆弱特征及城镇发展的紧迫需求，本文提出采用生态基底辨识与城镇增长模拟相结合的集成性研究方法，即以生态约束为基础，同时考虑城镇发展需求，以双向引导来平衡生态保护与城镇增长之间的关系，在此基础上识别未来城镇发展与生态本底之间可能存在的冲突，提出针对性的“三生”空间优化策略（图2），为城镇可持续发展提供更加可行的路径，指导当地“三生”空间协调发展。

第一步，在生态本底约束引导下，采用MCR模型判读城镇生态基底现实条件。首先，基于米脂县城中心城区现实情况识别生态源地，选择与确定影响生态源地的各类阻力因子及其相应阻力值。通过重分类这些阻力值，将各阻力因子的空间分布特征可视化，然后对各因子的空间分布图进行加权求

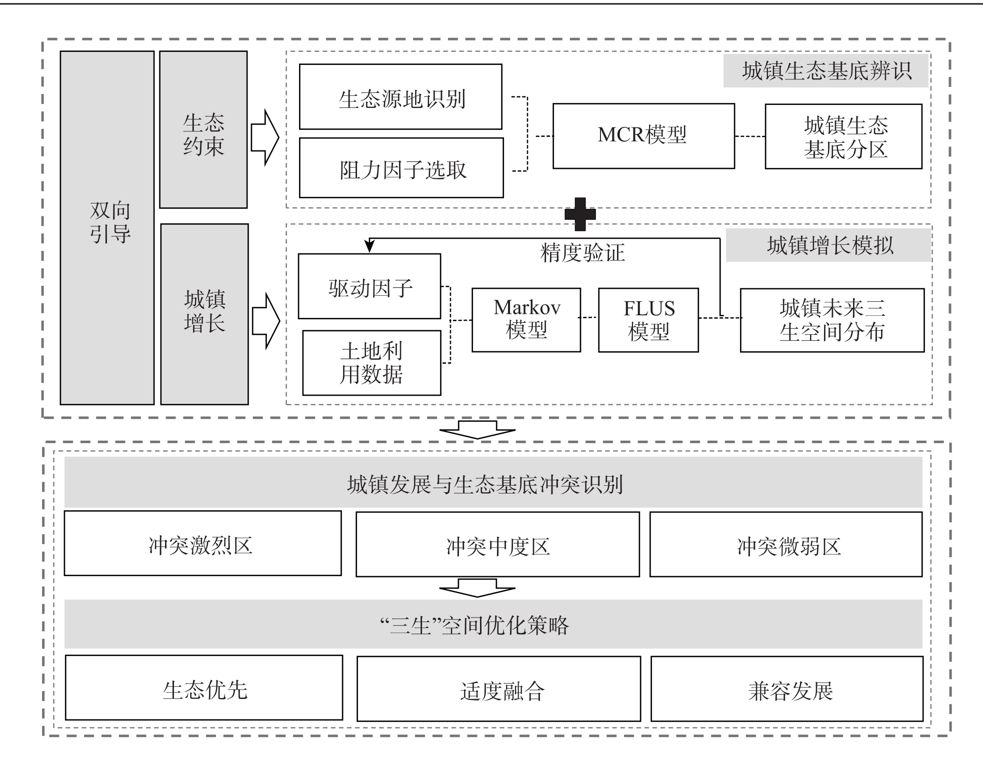


图2 “三生”空间优化框架

Fig. 2 Ecological-production-living spaces optimization frame

和，并根据值域划分等级，最终形成生态基底条件分区。

第二步，在城镇增长引导下，采用FLUS-Markov模型模拟未来米脂县城中心城区“三生”空间发展。首先，基于过去土地利用及相关数据，模拟现状“三生”空间的分布情况，并将已有的现状数据与模拟数据进行比对，采用Kappa系数对模拟结果进行精度验证[14]。在精度可行的基础上，采用Markov模型预测未来“三生”空间数量，以此作为输入FLUS模型的参数，模拟预测未来“三生”空间分布状况。

第三步，基于约束与增长双重引导下的冲突识别。将未来“三生”空间分布模拟结果与生态基底分区进行叠加，根据叠加矩阵，识别“三生”空间与生态基底冲突区域和等级，并对不同等级冲突区域提出优化策略。

2.3 研究方法

2.3.1 MCR模型　最小累积阻力模型最早由Knaapen等于1992年提出[15]，用于计算物种在从源到目的地运动过程中累积耗费的模型[16]。本文采用该模型构建生态用地扩张阻力面，辨识城镇生态基底分区，其计算公式如下：

$$\mathrm{MCR}=f_{\min}\sum_{j=n}^{i=m}D_{ij}\times R_i \quad (1)$$

式中：MCR为最小累积阻力值；D_{ij}为物种从源j到景观单元i的空间距离；R_i为景观对某物种运动的阻力系数。

借鉴前人研究成果[17-18]，充分考虑米脂县城中心城区地形和土地利用现状特点，遵循系统性、主导性、可作性和数据可获取性等原则，从自然、区位、现状三方面来构建阻力面，主要包括6项阻力因子（表1）。

2.3.2 Markov模型　Markov模型基于概率论，通过当前状态和变化趋势来估算未来的可能性[19]，可利用Markov模型用来预测土地利用变化，其计算公式如下：

$$S_{t+1}=P\times S_t \quad (2)$$

式中：S_{t+1}与S_t分别为t+1和t时的土地利用状态向量；P为t和t+1时间段内土地利用类型转移概率矩阵。

2.3.3 FLUS模型　本文采用FLUS模型对“三生”空间分布进行模拟。该模型涉及适宜性概率计算、邻域因子计算、自适应惯性系数计算与转换成本设定以及综合概率计算[20]。

（1）适宜性概率计算

城镇增长是土地利用属性的变化，是自然要素与社会要素共同作用的结果。自然要素如高程、坡

表1 生态用地阻力因子

Tab. 1 Ecological land use resistance factors

生态阻力因子		阻力因子分级				权重
		4	3	2	1	
自然	相对高差/m	<50	50~100	100~150	>150	0.05
	坡度/(°)	0~8	8~15	15~25	>25	0.19
区位	距道路距离/m	<100	100~250	250~500	>500	0.15
	距浇灌点距离/m	<500	500~1000	1000~1500	>1500	0.14
现状	土地利用类型	建设用地	耕地	园地	草地、林地、河流水面	0.18
	土壤侵蚀强度/$t \cdot km^{-2} \cdot a^{-1}$	<1000	1000~2500	2500~5000	>5000	0.29

度等会影响城镇增长的布局和建设可行性,而现状人口密度、到道路距离等要素则影响城镇增长的规模和方向。在全方位考虑可能影响要素的原则下,本文结合相关研究及米脂县城中心城区现实特征综合确定自然和社会要素2个方面的9项驱动因子[21-22](表2)。

表2 土地利用变化的驱动因子

Tab. 2 Drivers of land use change

类型	驱动因子
自然要素	相对高差
	坡度
	坡向
	到河流水系距离
	土壤侵蚀强度
社会要素	到铁路距离
	到公路距离
	到汽车站、停车场的距离
	人口密度

适宜性概率计算通过BP-ANN将基期的土地利用类型与驱动因子进行拟合,获得各土地利用类型的适宜性概率[23],其表达式为:

$$\mathrm{SP}_{(m,n,t)}=\sum_i w_{i,n}\times\frac{1}{1+\mathrm{e}^{-N_i(m,t)}} \tag{3}$$

$$N_i(m,t)=\sum_j w_{ji}\times x_j(m,t) \tag{4}$$

式中:$\mathrm{SP}_{(m,n,t)}$ 为适宜性概率;$w_{i,n}$ 为隐藏层与输出层的权重;$N_i(m,t)$ 为隐藏层神经元i接收输入层信号;$x_j(m,t)$ 为第j个神经元在迭代次数为t时元胞m的输入值;w_{ji} 为输入层与隐藏层的权重。

(2) 邻域因子计算

邻域因子表示不同土地利用类型间及邻域范围内不同土地利用单元间的相互作用[24],其表达式为:

$$\Omega_{m,n}^t=\frac{\sum_{N\times N}\mathrm{con}(c_m^{t-1}=k)}{N\times N-1}\times W_K \tag{5}$$

式中:$\Omega_{m,n}^t$ 为元胞m在t时刻的邻域影响因子;$N\times N$为窗口范围;$\sum_{N\times N}\mathrm{con}(c_m^{t-1}=k)$ 为用地类型k在最后一次迭代$t-1$时,在$N\times N$的Moore邻域窗口中所占的元胞总数;W_K 为各用地类型的邻域因子参数;其中,邻域因子参数取值范围为[0, 1],且其数值与用地扩展能力成正比。本文参考相关研究[25-26]经过多次测试调整,最终确定邻域因子参数如下(表3)。

表3 邻域因子参数

Tab. 3 Neighborhood factor parameter

邻域因子参数	生态空间	生产空间	生活空间
数值	0.2	0.5	1.0

(3) 自适应惯性系数计算与转换成本

自适应惯性系数用于显示各土地利用类型在预期与实际上的数量差异[27],其表达式为:

$$\mathrm{Inertia}_k^t=\begin{cases}\mathrm{Inertia}_k^{t-1}, & \left|D_k^{t-2}\right|\le\left|D_k^{t-1}\right|\\ \mathrm{Inertia}_k^{t-1}\times\dfrac{D_k^{t-2}}{\left|D_k^{t-1}\right|}, & D_k^{t-1}<D_k^{t-2}<0\\ \mathrm{Inertia}_k^{t-1}\times\dfrac{D_k^{t-1}}{\left|D_k^{t-2}\right|}, & 0<D_k^{t-2}<D_k^{t-1}\end{cases} \tag{6}$$

式中:$\mathrm{Inertia}_k^t$、$\mathrm{Inertia}_k^{t-1}$ 分别为用地类型k在迭代时间t、$t-1$时的惯性系数;D_k^{t-1}、D_k^{t-2} 分别为$t-1$、$t-2$时用地需求和实际数量之差。

转换规则即一种空间向另一种空间转换的困难程度,对于不允许转换的情况,矩阵值设为0;对于允许转换的情况,矩阵值设为1。在本研究中,自然发展情景下的3种空间彼此间均可相互转换(表4)。

表4 空间变化转换矩阵

Tab. 4 Spatial change transformation matrix

"三生"空间类型	生态空间	生产空间	生活空间
生态空间	1	1	1
生产空间	1	1	1
生活空间	1	1	1

(4) 综合概率计算

综合概率是基于上述因素，估算用地类型所占单元的总体转换概率，其表达式为：

$$TProb_{m,n}^{t} = SP_{(m,n,t)} \times \Omega_{m,n}^{t} \times Inertia_{k}^{t} \times (1 - sc_{c \to k}) \quad (7)$$

式中：$TProb_{m,n}^{t}$ 为元胞 m 在 t 时从初始用地类型转变为用地类型 k 的综合概率；$sc_{c \to k}$ 为用地类型从 c 变为 k 的转换成本。

(5) 精度验证

通过Kappa系数对现状数据与模拟数据进行比较，当Kappa>0.75时，表示模拟结果可信，模型适用于预测模拟[28]。

3 结果与分析

3.1 基于生态约束引导的城镇空间基底辨识

本文选取斑块面积大于1 hm²的生态用地作为生态源地。根据生态源阻力因子的分级情况(表1)，通过重分类获得各阻力因子的空间分布图(图3)，并进行加权求和，最终将其划分为3个等级，得到最终的生态基底条件分区(图4)，即生态保护区、生态控制区、一般生态区。

从规模上看，生态保护区面积3065.13 hm²，占城区面积的44.4%；生态控制区面积2852.09 hm²，占城区面积的41.3%；一般生态区面积最小，仅占城区面积的14.3%。从空间分布上看，生态基底评价结果呈现条带式分布，沿无定河两侧向外生态基底条件逐渐增强。生态保护区整体分布北多南少，主要位于城区外侧的山体区域，中部为无定河穿城而过；生态控制区空间分布不均，倾向于东侧区域；一

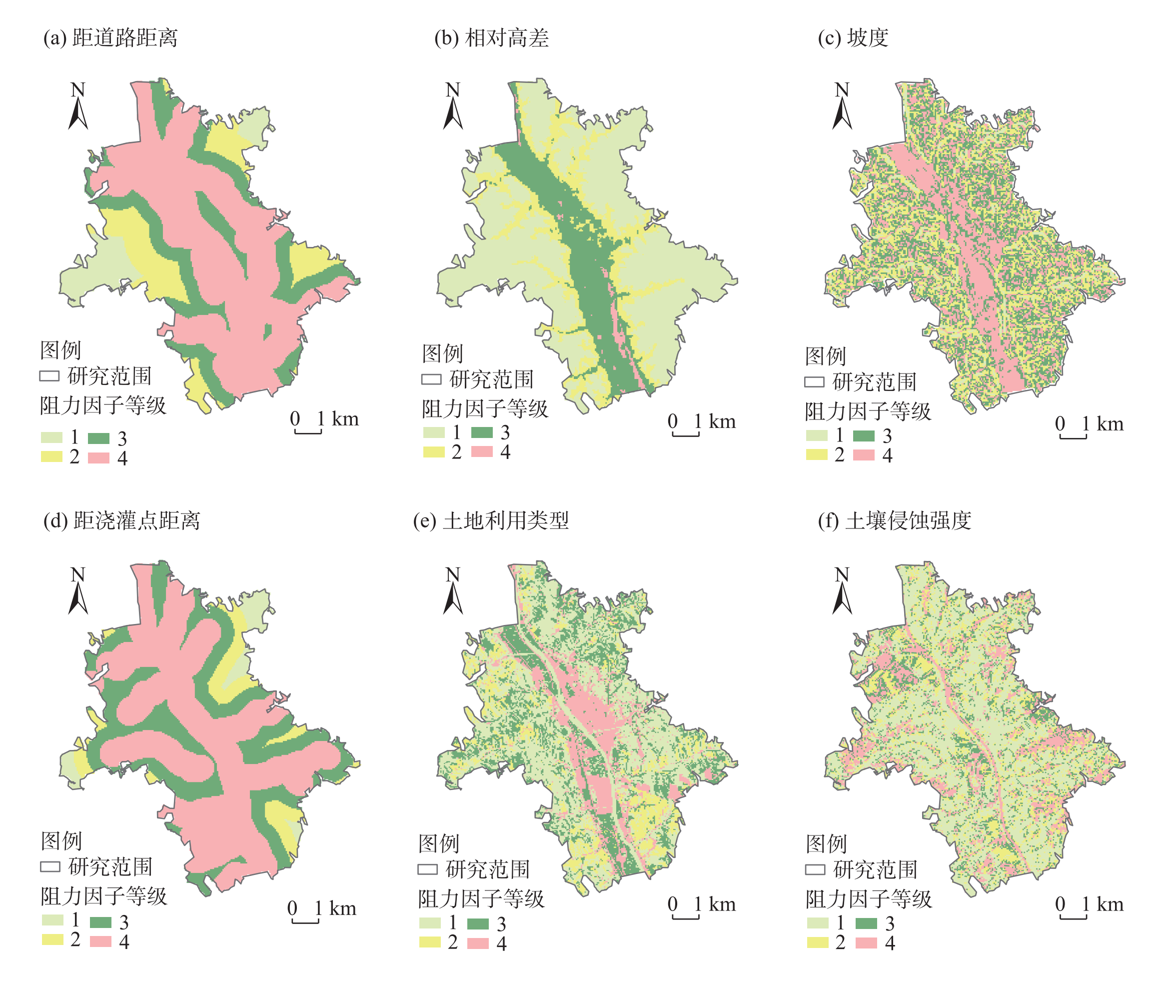


图3 生态源地阻力因子等级分布

Fig. 3 Grade distributions of resistance factors in ecological source area

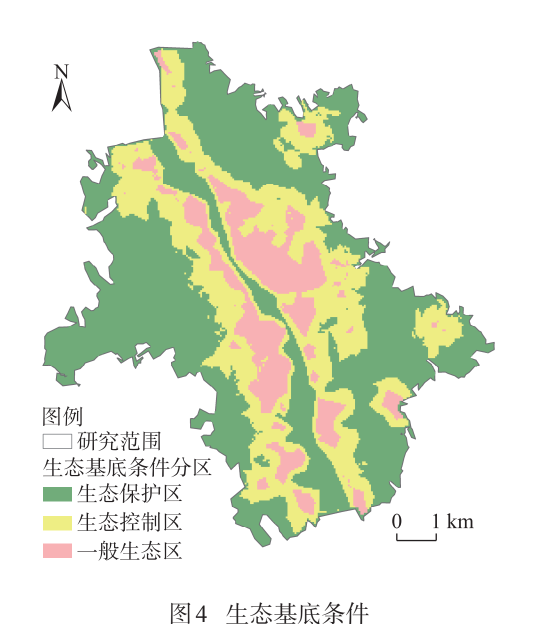


图4 生态基底条件

Fig. 4 Ecological base condition

般生态区主要沿无定河两岸呈团块状分布，部分零散分布于两侧山体，且东侧区域高于西侧。

3.2 基于城镇增长引导的“三生”空间模拟

以米脂县城中心城区2010年和2020年用地分类统计数据为基础进行“三生”空间分类识别（图5）。将水浇地、旱地、果园、工矿和交通建设用地识别为生产空间，河流水面、坑塘水面、林地、草地、湿地、未利用地识别为生态空间，城镇用地和村庄用地为生活空间。

从“三生”空间规模上看，城区主要由生态空间和生产空间构成，生活空间相对较小。在空间分布上，生活空间主要位于无定河两岸呈团块状分布；相对集中的生产空间沿无定河两岸在地形较为平坦的地区呈带状分布，其余生产空间主要分散分布于无定河以东区域；生态空间主要分布于两侧山体中，且无定河以西区域分布较多。

以2010年米脂县城中心城区“三生”空间分布现状为基期数据，对2020年“三生”空间分布进行模拟，并验证模拟结果与实际土地利用现状的精度。结果显示Kappa系数为0.84，表明模拟效果良好，该模型及其参数可作为本研究的基础。

基于2020年米脂县城中心城区的“三生”空间分布现状数据，对2035年的“三生”空间分布进行模拟（图6）。结果显示，到2035年，生态空间面积将减少803.33 hm^2，生产与生活空间面积将分别增加612.03 hm^2、191.30 hm^2（表5）。从“三生”空间相互转化情况来看（图7），生活空间转化为生态和生产空间较少，生态空间转换为生产空间面积最大，转换面积达到1235.51 hm^2，该结果在一定程度上与近年强调耕地保护优先的特点一致。在空间布局上，2035年米脂县城中心城区生态空间主要分散分布于沟壑和山体中，生产空间主要分布于水量相对较多、坡度相对较小的地域，生活空间主要沿无定河两岸相对平坦的谷地分布，并沿着部分沟壑向外部延伸。

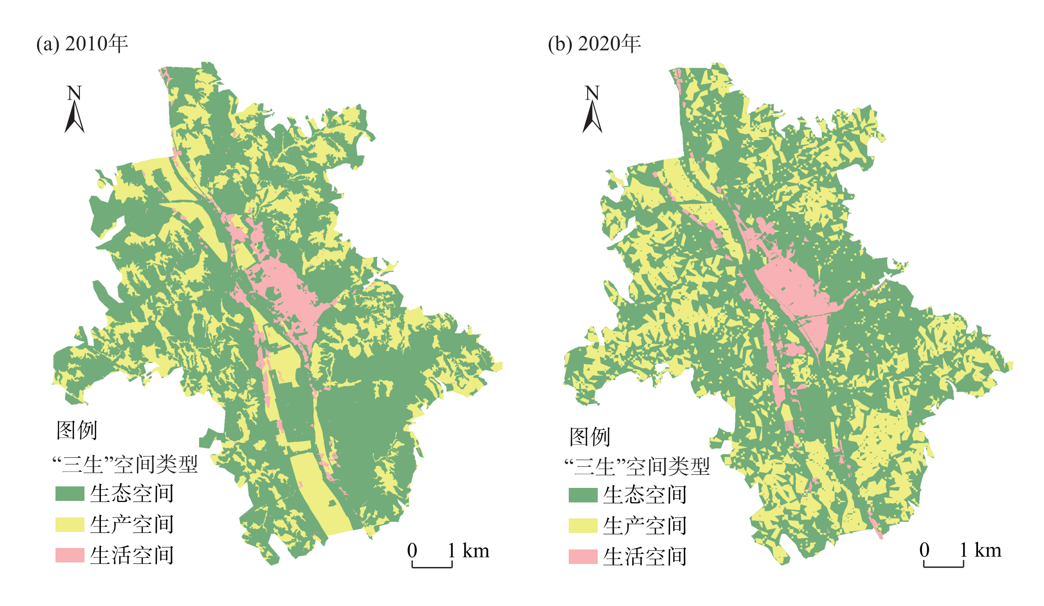


图5 “三生”空间分布

Fig. 5 Spatial distributions of ecological-production-living

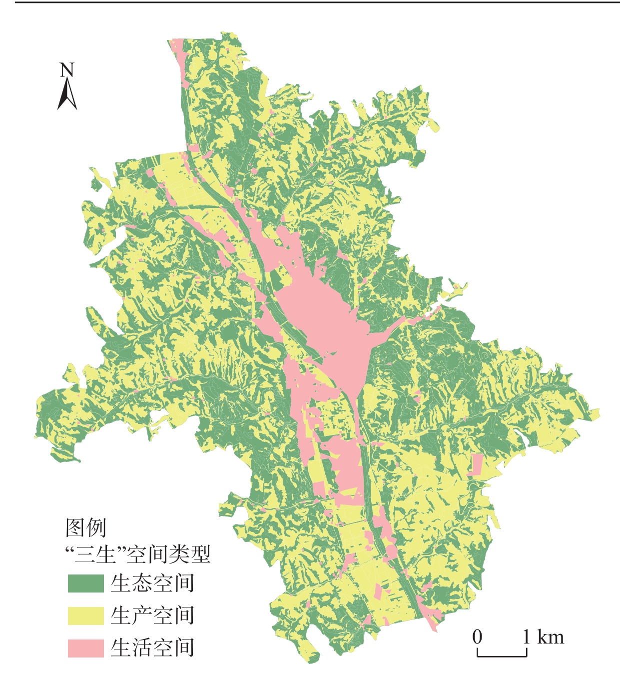


图6　2035年"三生"空间预测结果

Fig. 6　Prediction results of ecological-production-living spaces in 2035

表5　"三生"空间面积变化情况

Tab. 5　Change of the area of ecological-production-living spaces

/hm²

"三生"空间类型	2020年	2035年
生态空间	3887.56	3084.23
生产空间	2442.19	3054.22
生活空间	568.48	759.78

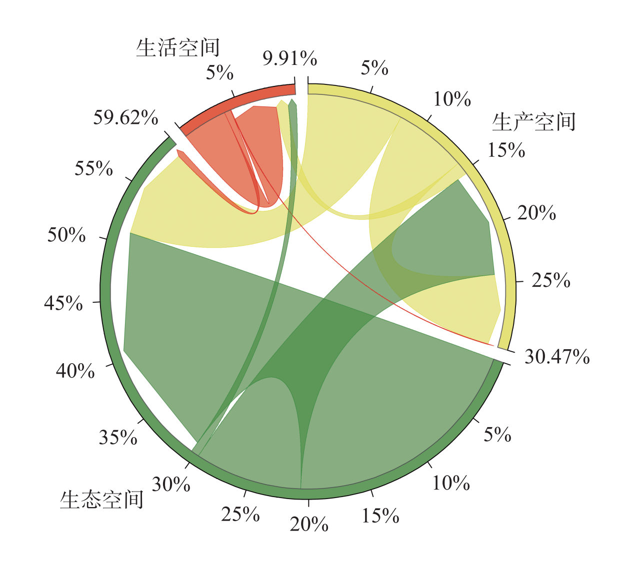


图7　2020—2035年"三生"空间相互转化情况

Fig. 7　Mutual transformation of ecological-production-living spaces from 2020 to 2035

3.3　基于约束与增长双重引导下的冲突识别

根据土地利用冲突识别矩阵(表6),通过叠加分析识别米脂县城中心城区2035年"三生"空间分布与生态基底相冲突与相协调区域及面积(图8)。

表6　土地利用冲突识别矩阵

Tab. 6　Land use conflict identification matrix

"三生"空间类型	生态保护区	生态控制区	一般生态区
生态空间	协调区	协调区	协调区
生产空间	冲突激烈区	冲突中度区	冲突微弱区
生活空间	冲突激烈区	冲突中度区	协调区

结果显示:米脂县城中心城区有40.80%的土地在未来存在冲突风险,冲突激烈区面积1606.54 hm²,约占城区的23.29%,冲突中度区面积968.19 hm²,约占城区的14.04%,冲突微弱区面积239.32 hm²,约占城区的3.47%。除冲突区外,4084.18 hm²为用地协调区,即没有发生冲突的区域,约占城区的59.20%。

冲突激烈区主要包含生态保护-生产空间冲突和生态保护-生活空间冲突。生态保护-生产空间冲突面积1502.76 hm²,占城区的21.78%,主要分散分布于城区两侧山体,部分呈带状分布于无定河两岸。生态保护-生活空间冲突面积103.78 hm²,占城区的1.51%,主要分布于无定河两岸,部分零散分布于两侧山体的村庄内。冲突中度区主要包含生态控制-生产空间冲突与生态控制-生活空间冲突。生态控制-生产空间冲突面积867.34 hm²,约占城区的12.86%,主要分散分布于城区南部。生态控制-生活空间冲突面积100.85 hm²,约占城区的2.62%,主要靠近城区中部,沿无定河走向呈带状分布。冲突微弱区是一般生态-生产空间冲突,面积239.32 hm²,约占城区的3.47%,主要沿无定河走向呈散点状分布。

生态与生产空间的现有冲突主要是由地域独特地形地貌和水土流失的双重问题所导致。首先,位于两侧山体中的冲突,来源于当地居民在山上筑造梯田,可以在用地紧约束的背景下增加生产面积,同时通过梯田层层拦截缓解水土流失,因此这类空间则具备生态和生产两大功能,进而出现相冲突的结果。其次,位于无定河两岸的冲突是由于两岸原本应预留充足生态安全缓冲区作为重要生态空间,但在当地少雨干旱的背景下该空间又具有良好的耕作条件,因此该区域被当作生产用地利用,

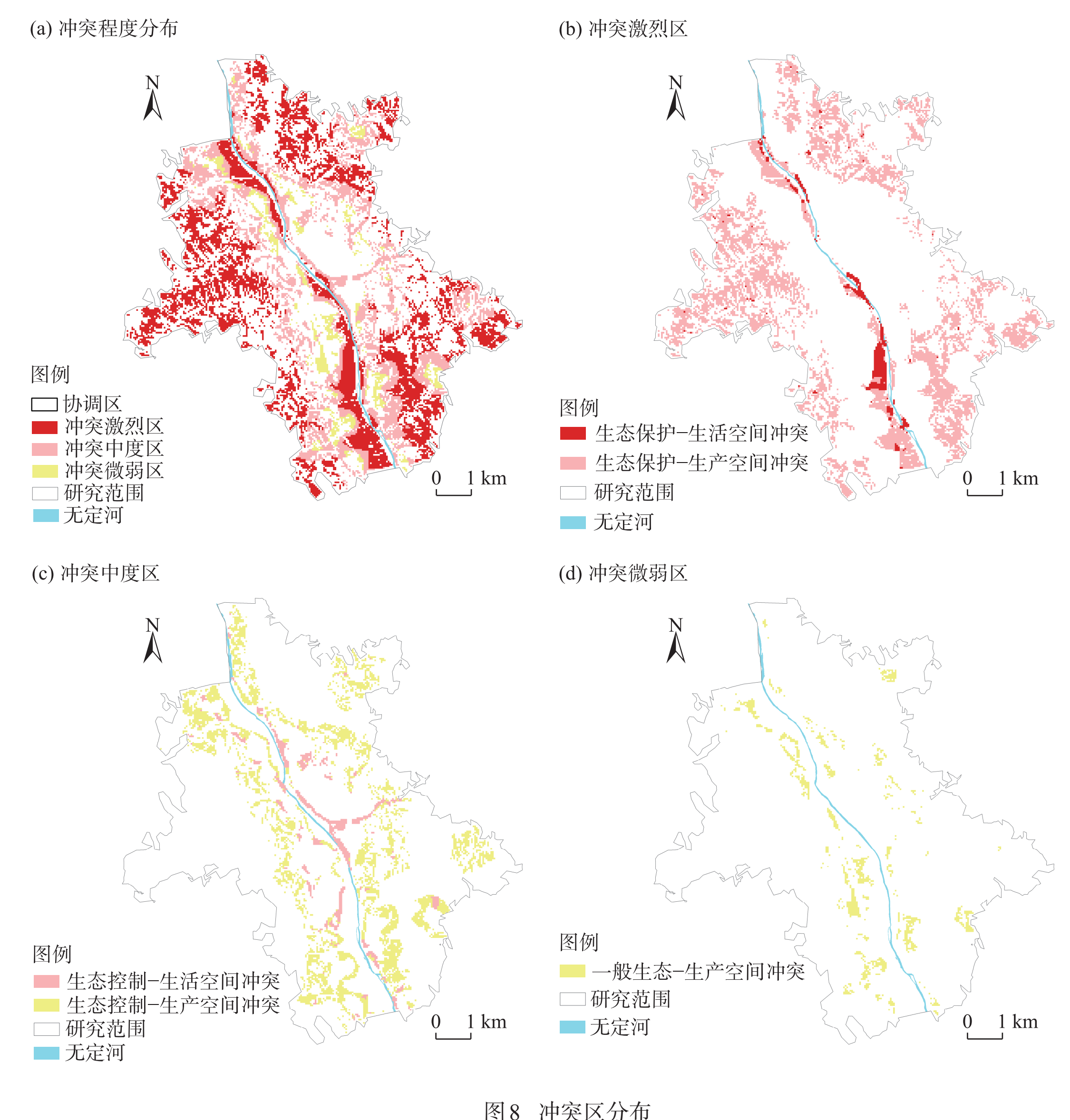


图8　冲突区分布

Fig. 8　Distribution of the degree of conflict

进而产生冲突。

生态与生活空间的冲突是由于在城镇化快速发展阶段，地区建设需求持续增长，而在这个过程中缺乏合理的引导与规划，对环境保护与土地利用规划方面的考虑不足，导致城镇及乡村建设项目侵占甚至破坏原本的生态空间。这种对原有生态空间的"蚕食"，不可避免地引发生态与生活空间的冲突。

3.4　米脂县城中心城区"三生"空间优化

3.4.1　生态优先：冲突激烈区"三生"空间优化　在城镇发展与生态保护的复杂交织中，冲突激烈区域往往具备着显著的双重功能属性，即同时承载着经济发展的潜力与生态系统的重要价值。对于该冲突区域应优先考虑保护和维护生态系统的完整性与功能性，实行严格的生态保护制度，对已受到不当开发活动影响的区域，制定并执行生态空间的退还与生态修复工作，以恢复其生态系统功能。

在生态保护-生产空间冲突激烈区中，位于无定河两岸的冲突面积约190.41 hm^2，该区域严禁任何形式的耕作与建设活动，并实施强化的管理措施，确保生态系统的稳定性和生态安全，对于现状为生产空间的应有序退出，逐步实现土地用途的转变，并采取相应的生态修复措施，以促进当地生态系统服务功能的恢复。其次，位于两侧山体中的冲突激烈区面积约1245.93 hm^2，该区域是水土流失及地质灾害易发区，因此应严格禁止开垦，并通过科

学种植适宜的乔木和灌木，比如柠条、杨树、刺槐等，同时进行水土保持林带建设、沟渠治理等生态修复措施，有效减少水土流失。

在生态保护-生活空间冲突激烈区中，约91.02 hm^2冲突用地为现状未建设用地，该区应在开发活动中予以优先保护，同时部署有效的监管体系，以防止不当开发对生态环境造成的损害，对于已经遭受一定程度干扰的区域，设计并执行生态修复工程，引入本土植物群落、重建水文周期等，以促进生境的自然复苏。其次，对于79.18 hm^2现状已建设区域，应迁出该区域，对于暂时没有条件迁出的区域应采取相应安全预防措施，并严格控制建设扩张，使得该区域萎缩发展，逐步退还生态空间并加强生态修复。

3.4.2　适度融合：冲突中度区“三生”空间优化　在冲突中度区域内，应在不损害生态系统基本功能的前提下，进行生态、生产与生活功能的适度融合。这要求在保护和维持生态功能的同时，科学合理地规划和管理生产及生活功能，以适当增加生产规模及效益、提高居民生活品质。

在生态控制-生产空间冲突中度区中，约181.23 hm^2的用地位于无定河两岸，该区域应在严格保障生态安全的基础上，通过合理规划将其开发为适应当地土壤和气候条件的高效经济作物种植区域，尤其是着眼于高附加值的农作物，如蔬菜等，既可以为城镇居民就近提供优质农产品，同时也显著提高土地产出效率，为当地农民创造更多经济收入。约579.21 hm^2的冲突区位于两侧山体中，该区域在发展过程中可采取梯田建设，有效减少雨水径流的速度和量，并选择种植一些固土能力较好的果树品种，在增加农业生产用地规模的同时减缓土壤侵蚀和水土流失。

在生态控制-生活空间冲突中度区中，现状已建设面积约107.11 hm^2，该区域应注意加强生态安全防治，保障生活安全，并逐步减少居住环境较差和交通不便地区的生活空间比例，同期开展建设用地的集约节约开发，同时关注该区域生态环境保护与修复工作。其次，未建设面积约100.64 hm^2，该区域在不破坏其生态完整性的前提下，与当地自然和生态价值相结合适当进行观光、游憩等功能的植入，从而既保证生态环境得到有效保护和修复，又大幅度提升居民生活品质。

3.4.3　兼容发展：冲突微弱区“三生”空间优化　在冲突微弱区域内，土地利用特征同时展现了生态与生产功能的兼容性。在城镇增长过程中，基于区位条件、地质特性及基础设施等具体现实因素，合理地对土地生态和生产用途进行选择，实现土地利用效益最大化。

在一般生态-生产空间冲突微弱区中，约149.21 hm^2的用地位于无定河两岸，该区域区位条件相对较好，可选择对生态环境及居民生活影响较小的生产类型，同时促进产业集聚程度，提高土地利用效率，位于两侧山体的冲突用地面积约90.11 hm^2，该区域可结合发展作为未来生产用地的补充。

4　结论

(1) 米脂县城中心城区生态基底评价结果分为生态保护区、生态控制区和一般生态区，其中生态保护区面积最大，约占城区面积的44.4%，一般生态区面积最小，仅占城区面积的14.3%。生态基底条件分区呈现条带式分布，沿无定河两侧向外生态基底条件逐渐增强。

(2) 2035年城区“三生”空间模拟结果显示：2035年生态空间面积呈下降态势，减少面积达803.33 hm^2，生产与生活空间面积均呈现增长态势，增长面积分别为612.03 hm^2、191.30 hm^2。生活空间转化为生态和生产空间较少，生态空间转换为生产空间面积最大，转换面积达到1235.51 hm^2。

(3) 米脂县城中心城区未来约40.80%的用地将面临冲突。其中，冲突激烈区面积1606.54 hm^2，约占城区的23.29%，冲突中度区面积968.19 hm^2，约占城区的14.04%，冲突微弱区面积239.32 hm^2，约占城区的3.47%。基于这些区域的不同特性，提出生态优先、适度融合和兼容发展的冲突区“三生”空间优化策略，旨在为促进该地区资源合理配置、实现地区可持续发展提供科学指导。

参考文献(References)

[1]　韩株桃, 石杰锋, 吴金华, 等. 基于POI数据及四叉树思想的“三生空间”识别方法[J]. 地球信息科学学报, 2022, 24(6): 1107-1119. [Han Zhutao, Shi Jiefeng, Wu Jinhua, et al. Recognition method of “The Production, Living and Ecological Space” based on POI data and Quad-tree idea[J]. Journal of Geo-information Science, 2022, 24(6): 1107-1119.]

[2] 王庆, 王承武. 大数据视角下的城市“三生”空间识别及分布特征研究——以乌鲁木齐市中心城区为例[J]. 资源开发与市场, 2022, 38(2): 142−147. [Wang Qing, Wang Chengwu. Research on spatial identification and distribution characteristics of “production-living-ecological” in cities from the perspective of big data: A case study of Urumqi City[J]. Resource Development & Market, 2022, 38(2): 142−147.]

[3] 焦庚英, 杨效忠, 黄志强, 等. 县域“三生空间”格局与功能演变特征及可能影响因素分析——以江西婺源县为例[J]. 自然资源学报, 2021, 36(5): 1252−1267. [Jiao Gengying, Yang Xiaozhong, Huang Zhiqiang, et al. Evolution characteristics and possible impact factors for the changing pattern and function of “production-living-ecological” space in Wuyuan County[J]. Journal of Natural Resources, 2021, 36(5): 1252−1267.]

[4] 马彩虹, 安斯文, 文琦, 等. 基于土地利用转移流的国土空间格局演变及其驱动机制研究——以宁夏原州区为例[J]. 干旱区地理, 2022, 45(3): 925−934. [Ma Caihong, An Siwen, Wen Qi, et al. Evolution of territorial spatial pattern and its driving mechanism based onland use transfer flow: A case of Yuanzhou District in Ningxia[J]. Arid Land Geography, 2022, 45(3): 925−934.]

[5] 黄金川, 林浩曦, 漆潇潇. 面向国土空间优化的三生空间研究进展[J]. 地理科学进展, 2017, 36(3): 378−391. [Huang Jinchuan, Lin Haoxi, Qi Xiaoxiao. A literature review on optimization of spatial development pattern based on ecological-production-living space [J]. Progress in Geography, 2017, 36(3): 378−391.]

[6] 刘荣增, 文慧敏, 王淑华. 郑州都市圈空间分区及优化研究——基于“三生”空间功能评价[J]. 城市发展研究, 2023, 30(3): 1−6, 23. [Liu Rongzeng, Wen Huimin, Wang Shuhua. Study on the spatial zoning and optimization of Zhengzhou metropolitan region with the evaluation of the function of “Sansheng” space[J]. Urban Development Studies, 2023, 30(3): 1−6, 23.]

[7] 翟玉鑫, 张飞云, 马丽娜. 基于三生空间的博斯腾湖流域生境质量时空演变及预估[J]. 干旱区地理, 2023, 46(11): 1792−1802. [Zhai Yuxin, Zhang Feiyun, Ma Lina. Evolution and prediction of habitat quality in the Bosten Lake Basin based on production-living-ecological space[J]. Arid Land Geography, 2023, 46(11): 1792−1802.]

[8] 陈小卉, 胡剑双. 江苏省乡村空间治理实践: 阶段、路径与模式[J]. 城市规划学刊, 2024(1): 38−45. [Chen Xiaohui, Hu Jianshuang. Rural spatial governance in Jiangsu Province: Stages, trajectories, and models[J]. Urban Planning Forum, 2024(1): 38−45.]

[9] 代秀龙, 赵家敏. 流域生态单元视角下全域土地综合整治路径——以广东省佛冈县汤塘镇省级试点为例[J]. 规划师, 2024, 40(1): 83−90. [Dai Xiulong, Zhao Jiamin. The path of comprehensive land consolidation in the whole region from the perspective of watershed ecological unit: The provincial pilot project of Tangtang Town, Guangdong Province[J]. Planners, 2024, 40(1): 83−90.]

[10] 李阜鹏, 韩惠, 杨树文. 甘肃省2000—2020年土地利用变化分析及基于PLUS的生态空间多情景模拟[J]. 科学技术与工程, 2023, 23(15): 6316−6326. [Li Fupeng, Han Hui, Yang Shuwen. Analysis of land use change in Gansu Province from 2000 to 2020 and multi-scenario simulation of Gansu's ecological space based on PLUS[J]. Science Technology and Engineering, 2023, 23(15): 6316−6326.]

[11] 赵寿露, 李石华, 许新惠, 等. 耦合MOP-FLUS模型的滇中城市群“三生”空间格局优化[J]. 水土保持研究, 2022, 29(4): 322−328. [Zhao Shoulu, Li Shihua, Xu Xinhui, et al. Production-life-ecological space pattern optimization of the urban agglomeration in centra Yunnan based on coupled MOP and FLUS model[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2022, 29(4): 322−328.]

[12] 付晶莹, 郜强, 江东, 等. 黑土保护与粮食安全背景下齐齐哈尔市国土空间优化调控路径[J]. 地理学报, 2022, 77(7): 1662−1680. [Fu Jingying, Gao Qiang, Jiang Dong, et al. Optimal requlation of spatial planning in the context of black soil preservation and food security in Qiqihar[J]. Acta Geographica Sinica, 2022, 77(7): 1662−1680.]

[13] 孙逊, 马乃喜, 曹明明, 等. 黄土高原志[M]. 西安: 陕西人民出版社, 1995: 1−19. [Sun Xun, Ma Naixi, Cao Mingming, et al. Loess Plateau chronicles[M]. Xi'an: Shaanxi People's Publishing House, 1995: 1−19.]

[14] 罗紫薇, 胡希军, 韦宝婧, 等. 基于多准则CA-Markov模型的城市景观格局演变与预测——以上杭县城区为例[J]. 经济地理, 2020, 40(10): 58−66. [Luo Ziwei, Hu Xijun, Wei Baojing, et al. Urban landscape pattern evolution and prediction based on multi-criteria CA-Markov model: Take Shanghang County as an example [J]. Economic Geography, 2020, 40(10): 58−66.]

[15] Knaapen J P, Scheffer M, Harms B. Estimating habitat isolation in landscape planning[J]. Landscape and Urban Planning, 1992, 23(1): 1−16.

[16] 俞孔坚. 生物保护的景观生态安全格局[J]. 生态学报, 1999, 19(1): 8−15. [Yu Kongjian. Landscape ecological security patterns in biological conservation[J]. Acta Ecologica Sinica, 1999, 19(1): 8−15.]

[17] 张继平, 乔青, 刘春兰, 等. 基于最小累积阻力模型的北京市生态用地规划研究[J]. 生态学报, 2017, 37(19): 6313−6321. [Zhang Jiping, Qiao Qing, Liu Chunlan, et al. Ecological land use planning for Beijing City based on the minimum cumulative resistance model[J]. Acta Ecologica Sinica, 2017, 37(19): 6313−6321.]

[18] 李嘉会, 吴金华, 王祯, 等. 黄土丘陵沟壑区农村居民点发展类型识别——以吴起县为例[J]. 干旱区地理, 2023, 46(3): 397−406. [Li Jiahui, Wu Jinhua, Wang Zhen, et al. Identification of rural residential development types in loess hilly and gully region: A case of Wuqi County[J]. Arid Land Geography, 2023, 46(3): 397−406.]

[19] 靳含, 杨爱民, 夏鑫鑫, 等. 基于CA-Markov模型的多时间跨度土地利用变化模拟[J].干旱区地理, 2019, 42(6): 1415−1426. [Jin Han, Yang Aimin, Xia Xinxin, et al. Simulation of land use

change at different time spans based on CA-Markov model[J]. Arid Land Geography, 2019, 42(6): 1415–1426.]

[20] 高周冰, 王晓瑞, 隋雪艳, 等. 基于FLUS和InVEST模型的南京市生境质量多情景预测[J]. 农业资源与环境学报, 2022, 39(5): 1001–1013. [Gao Zhoubing, Wang Xiaorui, Sui Xueyan, et al. Multi-scenario prediction of habitat quality in Nanjing based on FLUS and InVEST models[J]. Journal of Agricultural Resources and Environment, 2022, 39(5): 1001–1013.]

[21] 何苏玲, 贺增红, 潘继亚, 等. 基于多模型的县域土地利用/土地覆盖模拟[J]. 自然资源遥感, 2023, 35(4): 201–213. [He Suling, He Zenghong, Pan Jiya, et al. County-scale land use/land cover simulation based on multiple models[J]. Remote Sensing for Natural Resources, 2023, 35(4): 201–213.]

[22] 罗紫元, 曾坚. 资源环境保护下天津市用地空间增长模拟[J]. 地理研究, 2022, 41(2): 341–357. [Luo Ziyuan, Zeng Jian. Spatial growth simulation of land use in Tianjin from the perspective of resource and environmental protection[J]. Geographical Research, 2022, 41(2): 341–357.]

[23] 苏迎庆, 刘庚, 赵景波, 等. 基于FLUS模型的汾河流域生态空间多情景模拟预测[J]. 干旱区研究, 2021, 38(4): 1152–1161. [Su Yingqing, Liu Geng, Zhao Jingbo, et al. Multi-scenario simulation prediction of ecological space in the Fenhe River Basin using the FLUS model[J]. Arid Zone Research, 2021, 38(4): 1152–1161.]

[24] 李井浩, 柳书俊, 王志杰. 基于FLUS和InVEST模型的云贵高原土地利用与生态系统服务时空变化多情景模拟研究[J]. 水土保持研究, 2024, 31(3): 287–298. [Li Jinghao, Liu Shujun, Wang Zhijie. Multi-scenario simulation of spatial temporal changes of land use pattern and ecosystem services in Yunnan-Guizhou Plateau based on FLUS and InVEST models[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2024, 31(3): 287–298.]

[25] 任胤铭, 刘小平, 许晓聪, 等. 基于FLUS-InVEST模型的京津冀多情景土地利用变化模拟及其对生态系统服务功能的影响[J]. 生态学报, 2023, 43(11): 4473–4487. [Ren Yinming, Liu Xiaoping, Xu Xiaocong, et al. Multi-scenario simulation of land use change and its impact on ecosystem services in Beijing-Tianjin-Hebei region based on the FLUS-InVEST model[J]. Acta Ecologica Sinica, 2023, 43(11): 4473–4487.]

[26] Yang Y Y, Bao W K, Liu Y S. Scenario simulation of land system change in the Beijing-Tianjin-Hebei region[J]. Land Use Policy, 2020, 96: 104–677.

[27] 胡佶熹, 勒先文, 徐勇. 基于FLUS模型多情景土地利用变化对陆地生态系统碳储量影响——以江西萍乡为例[J]. 水土保持研究, 2024, 31(2): 299–309. [Hu Jiexun, Le Xianwen, Xu Yong. Estimating terrestrial eco-system carbon stock changes caused by multi-scenarios land-use changes based on the FLUS model: A case study of Pingxiang, Jiangxi[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2024, 31(2): 299–309.]

[28] 王保盛, 廖江福, 祝薇, 等. 基于历史情景的FLUS模型邻域权重设置——以闽三角城市群2030年土地利用模拟为例[J]. 生态学报, 2019, 39(12): 4284–4298. [Wang Baosheng, Liao Jiangfu, Zhu wei, et al. The weight of neighborhood setting of the FLUS model based on a historical scenario: A case study of land use simulation of urban agglomeration of the Golden Triangle of southern Fujian in 2030[J]. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(12): 4284–4298.]

Optimization of "ecological-production-living" spaces for urban areas in Loess Plateau hilly and gully region by the dual-guidance between constraints and growth: A case of the central urban area of Mizhi County

JIA Ruonan[1], WU Zuobin[1,2]

(1. Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, Shaanxi, China; 2. Xi'an Jianda Institute of Urban Planning and Design Co., Ltd, Xi'an 710055, Shaanxi, China)

Abstract: In the context of stringent ecological constraints in the Loess Plateau hilly and gully region and the growing demand for urban development, optimizing ecological-production-living (EPL) spaces is crucial for promoting the rational allocation of resources. This study employs an integrated research method combining ecological base identification with urban growth simulation, guided by ecological constraints and urban growth patterns in the Loess Plateau hilly and gully region. Using the central urban area of Mizhi County, Shaanxi Province, China as a case study, the ecological base conditions were evaluated using the minimum cumulative resistance (MCR) model. The Markov and FLUS models were applied to simulate the spatial distribution of EPL spaces in the urban area for 2035. Subsequently, intense, moderate, and weak conflict zones between ecological base conditions and the spatial distribution of EPL spaces in 2035 were identified, and optimization strategies were proposed for each conflicting zone. The results revealed the following: (1) The ecological base conditions in Mizhi County were categorized into three levels: ecological protection area, ecological control area, and general ecological area, with ecological protection area being the largest and general ecological area the smallest. (2) By 2035, ecological space is projected to decrease by 803.33 hm^2, while production and living spaces are expected to increase by 612.03 hm^2 and 191.30 hm^2, respectively. (3) Approximately 40.80% of the land in the central urban area of Mizhi County is at risk of conflict. Intense conflict zones account for 1606.54 hm^2, or 23.29% of the urban area; moderate conflict zones account for 968.19 hm^2, or 14.04%; and weak conflict zones account for 239.32 hm^2, or 3.47%. Based on the characteristics of each conflict zone, the study proposes EPL space optimization strategies focusing on ecological priority, moderate integration, and compatible development. The integrated research method presented in this study, which combines ecological base identification with urban growth simulation, demonstrates high applicability to the Loess Plateau hilly and gully region and offers valuable insights for the future optimization of EPL spaces in this area.

Key words: Loess Plateau hilly and gully region; ecological-production-living spaces; ecological constraints; urban growth; conflict identification